

O p i n i a

o rozprawie doktorskiej mgra inż. Andrzeja Sierakowskiego
pt. *Opracowanie metody pomiaru wymiarów krytycznych i optymalizacja procesu*
naświetlania z użyciem zintegrowanego mikroskopu bliskich oddziaływań
i systemu bezpośredniego naświetlania wzoru

Przekazana mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Sierakowskiego, kandydata do stopnia naukowego doktora nauk technicznych, ma charakterze eksperymentalny, a dokładniej rzecz ujmując – konstrukcyjno-technologiczny. Dotyczy istotnych problemów związanych z mikro- i nanolitografią, a prezentowane w niej rozwiązanie ma na celu ograniczenie kosztów optymalizacji tej metody definiowania kształtów. Tą tematyką zajmują się ośrodki naukowe na całym świecie od wielu lat. Autor podjął się ambitnego i ważnego z praktycznego punktu widzenia zadania, którym było opracowanie metody pomiaru wymiarów krytycznych wzoru i optymalizacja procesu jego naświetlania, z użyciem mikroskopu bliskich oddziaływań zintegrowanego z systemem bezpośredniego naświetlania. W części eksperymentalnej wykorzystał: a) do naświetlania wzorów metodą bezpośrednią (*DWL – Direct Writing Lithography*) – system *DWL 200* firmy Heidelberg Instruments Mikrotechnik, b) przy wyborze techniki pomiarowej – skonstruowany przez siebie mikroskop sił atomowych (*AFM – Atomic Force Microscope*), pracujący jako dodatkowy moduł systemu *DWL*, w trybie sił ścinających (*ShF – Shear Force*). Z takiego wyboru wynikała konieczność zastosowania głowicy *AFM*, charakteryzującej się zwartą budową, uzyskaną dzięki magnetoelektrycznej aktuacji i piezorezystywnej (*piezo*) detekcji wychylenia dźwigni pomiarowej. Integracja mikroskopu z systemem naświetlającym zwiększyła funkcjonalność urządzenia, oznaczonego przez autora symbolem *ShFM-piezo-DWL*, umożliwiając w ten sposób: przeprowadzanie charakteryzacji bezpośrednio po naświetleniu, wykonanie pomiaru w jednoznacznie zaadresowanym miejscu próbki (badanie całej powierzchni struktur testowych nie jest już wymagane), ocenę poprawności położenia wzoru względem innych, pochodzących z wcześniejszych procesów technologicznych. Wyniki pomiaru topografii ściśle określonych przekrojów na strukturze testowej stanowią podstawę oceny poprawności doboru użytych parametrów naświetlania. Nawet przy wielokrotnym skanowaniu badanego przekroju (np. 10-krotnym) uzyskuje się kilkudziesięciokrotne skrócenie czasu pomiaru w porównaniu do pełnego obrazowania. Osiągnięcie założonego celu pracy wymagało od mgra inż. Andrzeja Sierakowskiego rozwiązania wielu skomplikowanych problemów, z czym sobie doskonale poradził. Rozprawa stanowi logiczny ciąg myślowy, wsparty właściwie dobranymi cytowaniami z literatury przedmiotu i wynikami własnych jego prac,

świadczącymi o niemałych dokonaniach w tym zakresie. Podjęta tematyka jest aktualna (choć w ostatnim okresie widać spadek liczby publikacji ściśle z nią związanych) i dobrze wpisuje się w bieżący nurt badań.

Rozprawa, zajmując 205 stron formatu A4, składa się z siedmiu rozdziałów, poprzedzonych podziękowaniami, łacińską sentencją, spisem treści i użytych akronimów oraz z bibliografii. We wstępie (Rozdział 1) autor przedstawia motywację, cel pracy, jej strukturę i metodologię badań. Impulsem do ich podjęcia w rodzimym Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie, była „konieczność częstego dokonywania kompleksowej optymalizacji procesów fotolitograficznych w kontekście prowadzonych prac badawczo-rozwojowych (...) oraz nowych wdrożeń”. Kandydat dostrzegł ekonomiczną nieopłacalność tego rodzaju optymalizacji w odniesieniu do unikalnych projektów o charakterze badawczym czy wręcz ich niewykonalność przy zastosowaniu dotychczas stosowanych metod. Zwrócił też uwagę na szczególnie ważne zagadnienie doboru parametrów naświetlania emulsji w stosowanej w swych badaniach technice fotolitografii bezpośredniej, na zalety tej ostatniej przy prototypowaniu pojedynczych przyrządów, na ograniczenia procesów optymalizacji, wynikające z dokładności użytych metod pomiarowych służących do ich oceny, czy wreszcie na konieczność zużywania w procesie kompleksowej optymalizacji wielu podłoży testowych z odpowiednimi strukturami próbnymi, pociągającą za sobą (ze względu na wymóg identycznej historii technologicznej) poddanie ich nawet kilkudziesięciu procesom. Prezentowana w rozprawie metoda, której opracowanie było celem pracy, pozwala na optymalizację procesu naświetlania bez konieczności wywoływania emulsji. Dwa kolejne rozdziały stopniowo wprowadzają czytelnika w tematykę rozprawy. W pierwszym z nich omówiono zagadnienia dotyczące procesów litografii (parametry, ograniczenia, stosowane emulsje, techniki definiowanie wzoru), w następnym – problematykę związaną z metrologią i optymalizacją procesu litografii. Liczne ilustracje (44 rysunki) bardzo dobrze współgrają z tekstem obu rozdziałów. Warto podkreślić, że niemal połowa z nich jest wynikiem doświadczeń autora. Rozdziały 4÷7, zawarte na 105 stronach rozprawy, są już ściśle związane z realizowaną pracą i zmierzają krok po kroku do osiągnięcia zamierzonego celu. Najpierw kandydat poddał go analizie w kontekście aktualnego stanu wiedzy (Rozdz. 4), po czym przystąpił do szczegółowego opisu zbudowanego stanowiska badawczego z systemem do naświetlania techniką bezpośrednią i mikroskopem sił atomowych pracującym w trybie sił ścinających (Rozdz. 5). Bardzo ważny rozdział szósty poświęcił opisowi procedur pomiarowych wykorzystywanych do optymalizacji procesu naświetlania, ze szczególnym uwzględnieniem takich zagadnień jak: wyznaczenie położenia sondy pomiarowej, zwiększenie dokładności centrowania, minimalizacja błędu zszywania i wyznaczenie optymalnych parametrów procesu naświetlania. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i rozważanie perspektywiczne. Rozprawę kończy bibliografia zawierająca aż 226 pozycji literaturowych, w tym 18, których kandydat jest współautorem (w pięciu na pierwszym miejscu). Zdecydowana większość to prace z ostatniego czterdziestolecia, w tym około 1/3 to publikacje z lat 2006 – 2015. Z okresu 2011 – 2015 pochodzi 37 prac (w 16 kandydat jest współautorem). Warto podkreślić, że w tym zbiorze znalazły się też ważne czy wręcz przełomowe pozycje literaturowe z wcześniejszego okresu, sięgającego nawet pierwszej połowy XIX wieku, co jest raczej rzadkością w tego rodzaju opracowaniach.

Rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Sierakowskiego jest, jak to się zwykle określać, dobrze napisana, tak pod względem stylu, jak i poprawności języka, jasności sformułowań. Czyta się ją doskonale

(np. bardzo przydatne jest odwoływanie się do wcześniej omówionych zagadnień z podaniem stosownego rozdziału, strony, rysunku czy wzoru), co nie oznacza, że udało się uniknąć błędów i potknięć, zarówno merytorycznych jak i redakcyjnych, które dotyczą nie tylko tekstu, ale także spisu treści, spisu akronimów, rysunków i podpisów pod nimi. Pragnę jednak mocno podkreślić, że nie mają one większego wpływu na moją wysoką ocenę wartości merytorycznych rozprawy. Do potknięć redakcyjnych, dość częstych ale drobnych, należy zaliczyć, między innymi, nadużywanie słów *pomimo* zamiast *mimo*, *poprzez* zamiast *przez*, czy zwroty: *naświetlone z taką dawką* (dopuszczalne, jeśli *z taką dawką, jak...*), czy *ekspotencjalnie* zamiast *eksponencjalnie* (str. 97). Do tego rodzaju potknięć zaliczyłbym również drobną niezgodność tytułu pracy z jej tekstem, w którym (słusznie moim zdaniem) użyte w spisie akronimów czy na stronie 138 słowo 'integracja', dotyczy połączenia, scalenia czy zespolenia mikroskopu bliskich oddziaływań z systemem bezpośredniego naświetlania, a nie (jak w tytule) zintegrowanego mikroskopu, chociaż jest on rzeczywiście zintegrowany. Dość niefortunne wydają mi się często używane przez autora (i nie tylko przez niego) określenia *mikroskop ShFM-piezo-DWL*, *obrazy mikroskopii SEM* czy *mikroskopia AFM*. Po rozwinięciu wymienionych akronimów otrzymuje się tzw. 'masło maślane', tj. dwukrotnie występujące słowo 'mikroskopia' bądź 'mikroskop'. Sądzę, że lepiej stosować terminy rodzaju: system *ShFM-piezo-DWL*, układ *ShFM-piezo-DWL*, urządzenie *ShFM-piezo-DWL*, obrazy SEM / AFM, przy użyciu SEM / AFM itp. Kontynuując wątek terminologiczny – nie mogę się zgodzić na nazwanie przez doktoranta LER (*Line Etch Roughness*) parametrem określającym odchyłkę od linii prostej krawędzi wzoru, a LWR (*Line Width Roughness*) – jednorodnością szerokości linii. Otóż w obu akronimach występuje słowo chropowatość i dla danego odcinka linii krawędzi wyznacza się, zgodnie z literaturą przedmiotu, jej parametry, np. *Range for LER*, *Range for LWR*, *Average roughness for LER*, *Average roughness for LWR* itd. Tak więc LER to nic innego jak *chropowatość (!) linii krawędzi wzoru* (termin znany z literatury). LWR odnosi się również do chropowatości, ale obu krawędzi.

Oprócz wymienionych już błędów i potknięć, wyjaśnienia wymagają niektóre kwestie, szczególnie te zawarte na:

str. 92/93 – w to raz szerokość belki, raz jej przemieszczenie,

rys.5-19 – co oznacza symbol a ,

str. 120 – podane na niej podstawowe właściwości dźwigni piezorezystywnej to: skuteczność aktuacji wychylenia, czułość ugięciowa detektora piezorezystywnego, częstotliwość rezonansowa, stała sprężystości, natomiast w rozdziałach 5.2.5.1 - 5.2.5.3 omawiane są: czułość aktuacji wychylenia, czułość detekcji wychylenia dźwigni i stała sprężystości (całkowicie pominięta została częstotliwość rezonansowa). Czy zatem czułość aktuacji = skuteczność aktuatora = sprawność (por. rys. 5-30)? Brak jasności (przydałyby się definicje),

rys. 5-31 – brakuje na osi rzędnych jednostek I_{PR} ,

rys. 6-16 – w tekście nad rysunkiem jest *w funkcji dawki naświetlenia*, a w podpisie *w zależności od mocy lasera*. Opisy występujące nad niektórymi rysunkami uważam za zbędne (na ogół powielają informacje zawarte w podpisie). W komentarzu do ww. rysunku autor stwierdza, że *zmiana grubości ma charakter liniowy*, a z rysunku wynika, iż raczej krzywoliniowy, ewentualnie – w przybliżeniu liniowy.

I jeszcze dwie uwagi: pierwsza – w niemal wszystkich opisach wzorów brakuje jednostek wielkości w nich występujących, np. dla czasu t [s] itp., druga – na wielu stronach pozostawione są puste przestrzenie (ze względu na rysunek na następnej stronie), które można było z powodzeniem wykorzystać wypełniając je tekstem. Na zakończenie tej części pragnę zaznaczyć, że informacje dotyczące zauważonych przeze mnie w rozprawie błędów zostały przekazane doktorantowi.

Z pracą nad realizacją doktoratu, jak i z samą rozprawą doktorską związanych jest wiele osiągnięć naukowych mgra inż. Andrzeja Sierakowskiego. Najważniejsze z nich (niektóre* noszą znamiona nowości) zostały wymienione i pokrótce omówione poniżej.

1. Zastosowanie przez autora, odmiennego od typowych rozwiązania konstrukcyjnego, w którym wszystkie elementy funkcjonalne głowicy (sonda pomiarowa, skanery piezoelektryczne odpowiedzialne za przesuw we wszystkich trzech osiach oraz układ dokładnego zbliżania) znajdują się nad mierzoną próbką. Cechą wyróżniającą konstrukcję opracowaną przez doktoranta na tle znanych z literatury jest zintegrowanie *ShFM-piezo* z systemem *DWL**. Zalety: (i) rozwiązanie to umożliwia zamocowanie próbki o wymiarach 200 mm na 200 mm i pomiar w zakresie 200 mm na 140 mm, (ii) opracowane procedury kalibracyjne pozwalają na przeprowadzenie pomiaru AFM w ściśle zaadresowanym miejscu na próbce, (iii) możliwość przeprowadzenia charakteryzacji naświetlonego, ale niewywołanego wzoru, co pozwala znacznie uprościć procedury mające na celu wyznaczenie optymalnych parametrów procesu naświetlania techniką bezpośrednią, (iv) możliwość zwiększenia kontrastu w trakcie pomiaru obszarów naświetlonych i nienaświetlonych emulsji światłoczułych dzięki zastosowaniu mikroskopu sił ścinających, w którym tłumienie drgań sondy pomiarowej zależy nie tylko od odległości, ale także od reaktywności chemicznej mierzonej warstwy, (v) możliwość stosowania dźwigni pomiarowej z planarnym ostrzem (produkcja znacznie prostsza niż dźwigni z ostrzem 3D), łatwo integrującym się z dźwignią piezorezystywnego mostka, odpowiedzialnego za detekcję jej wychylenia. Rozwiązanie to jest chronione patentem (na terenie RP). Dokonano także zgłoszenia patentowego na terenie Niemiec, Francji, Anglii, Włoch i Austrii zgodnie z procedurą EPC (*European Patent Convention*).

2. Zastosowanie zintegrowanej pętli prądowej do magnetoelektrycznej aktuacji wychylenia*, co pozwoliło (w porównaniu z termiczną metodą aktuacji) znacznie zmniejszyć poziom szumów w torze pomiarowym i umożliwić ściśle definiowanie drgań rezonansowych dźwigni mikroskopu.

3. Zastosowanie wstępnego procesu amorfizacji podłoża w trakcie wytwarzania piezorezystywnego układu detekcji wychylenia, pozwalającego znacznie zmniejszyć ilość defektów na granicy wykonanego złącza p-n (w porównaniu ze standardową technologią wytwarzania piezorezystorów – metoda została opracowana w Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych ITE w Warszawie).

4. Zaprezentowanie procedur kalibracyjnych, umożliwiających wyznaczenie metrologicznych właściwości dźwigni z magnetoelektryczną metodą aktuacji i piezorezystywną detekcją wychylenia oraz zaproponowanie i opracowanie procedur pomiarowych pozwalających na przeprowadzenie optymalizacji procesu naświetlania bez konieczności wywoływania wzoru*, w tym: (i) opracowanie oprogramowania, kontrolującego proces skanowania, pozwalającego na zmianę wielu parametrów wpływających na przebieg procesu pomiaru – sterowanie ruchem skanera *XY* realizowane jest za pomocą karty pomiarowej, która

rejestruje jednocześnie sygnały z sensorów tensometrycznych skanera XY (pozycja sondy), interferometru (pozycja stołu DWL) oraz regulatora PID (topografia powierzchni), (ii) możliwość ustawiania równoległego położenia układów pozycjonujących – odbywa się ono wg procedury opracowanej przez doktoranta (układ zbliżania sondy do próbki jest głównym elementem mechanicznym głowicy pomiarowej $ShFM$ -piezo- DWL).

5. Przedstawienie kompletnej analizy niepewności pomiaru geometrii naświetlonych ale niewywołanych struktur, co jest bardzo istotne w wypadku, gdy opracowany system ma służyć do kontroli procesu technologicznego – wzór jest badany w ściśle określonym, a nie w przypadkowym miejscu. W tym rozumieniu jest to rozwiązanie unikalne na skalę światową o ogromnym potencjale użytkowym*.

Reasumując, mgr inż. Andrzej Sierakowski wykazał wiedzę i umiejętności w zakresie prowadzenia badań naukowych w obszarze, co warto zaakcentować, trudnym, często nieznanym, obejmującym: wielokrotne planowanie i realizację złożonych procesów technologicznych, ich modyfikację, posługiwanie się nowoczesnymi metodami badawczymi i skomplikowaną aparaturą badawczą, interpretację uzyskanych wyników. Doktorant musiał sprostać nowym wyzwaniom stawianym przez kolejne realizowane zadania. Godna pochwały jest jego cierpliwość i nieustępliwe dążenie do celu. Cel rozprawy został osiągnięty, a wyniki prowadzonych prac badawczych zweryfikowane ich publikacją w czasopiśmie naukowych i materiałach konferencyjnych.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Sierakowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i z nadmiarem spełnia wymagania ustawowe („Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi poprawkami i uzupełnieniami) i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony i uznanie za wyróżniającą się.

